

IDENTIFICACION Y CARACTERIZACION HIDROLOGICA DE LAGUNAS DEL NORESTE DE LA PROVINCIA DE LA PAMPA

Dornes, Pablo F.¹, Comas, Rocío N.¹, Cardín, Daniel², Pochetti, Roberto¹, Ianni, Juan¹ y Kruse, Eduardo^{3,4}.

1. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa.
Av. Uruguay 151. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Tel: 54-2954-245220 int.7620, Fax: 432535.
Email: pablodornes@exactas.unlpam.edu.ar

2. Dirección General Catastro de La Pampa, Casa de Gobierno, Santa Rosa, La Pampa.

3. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

4 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

Resumen

La ocurrencia de lagunas en la región pampeana occidental, es consecuencia de la dinámica del ciclo hidrológico. Sin embargo, dicho efecto no es uniforme y es más notorio en determinados sectores o áreas con geoformas características que resultan en interacciones agua subterránea-superficial particulares. Fundamentado en la amplia variabilidad observada, el objetivo fue identificar las lagunas existentes y caracterizar su ocurrencia y dinámica hidrológica. El estudio cubrió un área de 58.300 km² en el NE de la provincia de La Pampa y se basó en el uso de sensores remotos a partir del análisis de imágenes los satélites LANDSAT 5 y 8. Se utilizaron tres periodos con características hidrológicas contrastantes, 2001 (húmedo), 2009 (seco) y 2013 (actual y situación media). La identificación de lagunas se realizó por medio de dos índices espectrales (MNDWI y CEDEX). Según el comportamiento hidrológico registrado, se diferenció a las lagunas en permanentes, semi-permanentes y temporarias, se inventariaron más de 4.500 lagunas e identificaron 8.100 cuerpos de agua menores. El área anegada fluctuó entre periodos húmedos y secos de 185.000 ha a 13.000 ha. Además, fue posible la agrupación de lagunas en cuatro tipos principales.

Palabras claves: La Pampa, lagunas, sensores remotos.

Abstract

The occurrence of lagoons in the western Pampas region is a consequence of the dynamics of the hydrological cycle. However, this effect is not uniform and is more noticeable in certain sectors or areas with given landforms that result in particular groundwater-surface interactions. Based on the wide observed variability, the objective was to identify lagoons and characterize their occurrence and hydrological dynamics. The study covered an area of 58,300 km² in the NE La Pampa province. It was based on the use of remote sensing through the image analysis of the LANDSAT 5 y 8 satellites. Three periods with contrasting hydrological characteristics were used, 2001 (wet), 2009 (dry) and 2013 (current and average situation). The identification of lagoons was conducted by two spectral indices (MNDWI and CEDEX). According to the hydrological behavior registered, permanent, semi-permanent and temporary lagoons were defined; more than 4,500 lagoons were inventoried and 8,100 ponds were identified. The flooded area fluctuated between wet and dry periods from 185,000 ha to 13,000 ha. In addition, it was possible grouping the lagoons in four main types.

Keywords: La Pampa, lagoons, remote sensing.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los fenómenos de escorrentía superficial en la llanura pampeana, caracterizada por sus bajos gradientes hidráulicos y la falta de sistemas de drenaje definidos, son debido a los excesos de precipitación que en dichas áreas se originan cuando el volumen resultante de la precipitación menos la evapotranspiración, excede la capacidad máxima de almacenamiento edáfico el cual resulta también disminuido, por el ascenso de los niveles freáticos. En tales circunstancias, la escorrentía y la descarga acuífera hacia áreas deprimidas resulta en la formación de numerosas lagunas que dependiendo de las geoformas puede dar lugar a procesos de escorrentía a partir de la interconexión de áreas deprimidas. Así, la ocurrencia de lagunas está relacionada a escenarios de excedentes hídricos pudiendo conformar grandes áreas anegadas (Ussunoff et al., 1999; Kruse y Zimmermann, 2002).

En la región pampeana occidental la ocurrencia de lagunas, es también consecuencia de la dinámica del ciclo hidrológico con un notable incremento de su número y extensión en períodos húmedos, disminuyendo marcadamente en períodos secos. Sin embargo, dicho efecto no es uniforme y es más notorio en determinados sectores o áreas con geoformas características que resultan en interacciones agua subterránea-superficial particulares y con mecanismos generadores de escorrentía del tipo hortoniano, raramente presentes en llanura pampeana oriental (Dornes et al., 2014).

Fundamentado en la amplia variabilidad espacial observada en el sector noreste de la provincia de La Pampa, el objetivo fue identificar las lagunas existentes y caracterizar su ocurrencia y dinámica hidrológica. Este trabajo formó parte de la ejecución de la primera etapa del Inventario de los Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa (UNLPam, 2015) a los efectos de implementar un sistema de clasificación u ordenamiento de cuerpos de agua a partir un análisis integrador de aspectos hidrológicos, hidroquímicos y geomorfológicos, como herramienta de gestión de la Secretaría de Recursos Hídricos de La Pampa.

METODOLOGIA

Área de Estudio

El estudio cubrió un área total de 58.300 km² en el noreste de la provincia de La Pampa (Figura 1) abarcando cuatro de las regiones hídricas cartografiadas por Giraut et al. (2006). La región está ubicada en un área de transición entre el clima templado subhúmedo o pampeano al Este y el semiárido al Oeste. Las temperaturas medias anuales fluctúan entre los 16,1 y 14,9°C. El invierno es seco y presenta una temperatura mínima media mensual de 2°C mientras que el verano es caluroso con la máxima media mensual superior a los 22°C. Las precipitaciones anuales oscilan entre 800 mm al NE y 500 mm al SO, con mayores precipitaciones en el período estival aunque concentrándose en los meses de transición de otoño y primavera, y muy escasas en el período invernal.

El área de estudio incluye cuatro regiones hídricas con una estrecha vinculación a sus características geomorfológicas. La región medanosa de la llanura oriental (Región I), es una extensión del campo de médanos modelados por acción eólica e hídrica y conforma una extensión del paisaje del oeste bonaerense. En dicha región la ocurrencia de lagunas está en estrecha relación a la pluviometría y al consecuente ascenso del nivel freático, que se manifiesta a partir de flujos de descarga local de médanos o dunas a depresiones o bajos topográficos. La región de la planicie pampeana central (Región II) posee un relieve uniforme, suavemente ondulada alternando pequeñas lomas y depresiones, donde suele existir una costra calcárea cubierta por sedimentos de origen eólico. Los cuerpos de agua se ubican típicamente en cubetas de deflación asociadas a médanos o acumulaciones arenosas locales. La región de la planicie longitudinal con bajos medanosos (Región III) presenta un relieve ondulado aunque con características contrastantes, que resultan en una mayor ocurrencia de cuerpos de agua en el sector sur caracterizado por un potente manto arenoso denominado El Meauro y con niveles saturados más someros que el sector norte. La región de los valles transversales (Región IV) se manifiesta por medio de valles de gran

longitud alineados con rumbo SO/NE, que pueden contener cordones medianosos y lagunas asociadas a los mismos. Se destacan también las lagunas hipersalinas generalmente ubicadas al final de los valles en el sector oriental de los mismos.

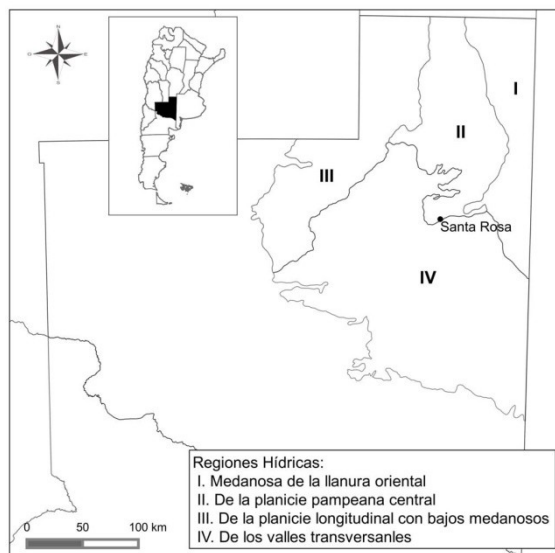


Figura 1. Área de estudio y detalle de las regiones hídricas estudiadas.

Identificación de lagunas

Considerando la extensión areal y el gran número de lagunas existentes, la identificación de las mismas se realizó mediante el uso de sensores remotos. El estudio se basó en análisis de imágenes ópticas multiespectrales con cobertura espectral en las longitudes de onda del visible y del infrarrojo de onda corta y térmico TM (Thematic Mapper) del satélite LANDSAT-5 y OLI (Operational Land Imager) del satélite LANDSAT-8, con una resolución espacial de 30 x 30 m y un ancho de cobertura 180 x 180 km. El análisis de dichas imágenes permitió discriminar distintos tipos de cubiertas como el límite agua – no agua (resolución espectral) y la capacidad de registrar información de detalle (resolución espacial).

Para identificar la existencia de los cuerpos de agua y comparar su permanencia en el tiempo fueron seleccionados tres años contrastantes que representan condiciones hidrológicas medias, de excedente y de sequía. Se utilizaron imágenes del año 2013 como condición media o actual, imágenes del año 2001 para la situación de excedentes y para la de sequía o período seco, imágenes del año 2009. La selección de la fecha de las imágenes dependió de la variabilidad pluviométrica espacial registrada en el área de estudio, de la cobertura nubosa presente en las imágenes y de la disponibilidad en el sitio web de Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos.

Debido a diversos factores y en especial a la profundidad del agua en las lagunas, muchas veces somera con rango de reflectancia similares a suelos húmedos, resultó más satisfactorio la implementación de índices espectrales basados en la baja reflectividad del agua en las bandas del infrarrojo cercano y medio por sobre técnicas de clasificación supervisada o no supervisada. Fueron seleccionados en función de su performance el índice del CEDEX (Ángel Martínez, 1994; Castaño, 1999) descrito en la Ecuación 1 para imágenes Landsat 5 y el índice modificado de diferencial de agua normalizado (MNDWI; Hanqiu Xu, 2006) detallado en la Ecuación 2, para imágenes Landsat 8 correspondientes al año 2013.

$$CEDEX = \frac{NIR}{R} - \frac{NIR}{MIR} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{G - MIR}{G + MIR} \quad (2)$$

Siendo:

G (banda 2): verde, R (banda 3): rojo, NIR (banda 4): Infrarrojo cercano y MIR (banda 5): Infrarrojo medio. Para la aplicación del MNDWI fue considerada la diferencia que presenta el Landsat 8 en el ancho de longitud de onda de cada banda con respecto a satélites anteriores.

Se observó claramente la sensibilidad de la banda MIR que resulta en una marcada diferenciación de cuerpos de agua respecto del suelo y la vegetación. Considerando la significativa diferencia en la ocurrencia, área y profundidad de cuerpos de agua entre períodos húmedos y secos se procedió a un análisis de sensibilidad del rango de selección que resultó en los siguientes valores de píxeles para el agua: 2001 $<0,4$ (CEDEX), 2009 <0 (CEDEX), y 2013 $0 < \text{agua} < 5$ (MNDWI). La Figura 2 ilustra la comparación, para un área al noreste de la localidad de Villa Mirasol y al oeste de la localidad de Quemú Quemú donde se destaca la Depresión Central conocida como el Cañadón, entre las lagunas observadas en una imagen Landsat en el período húmedo correspondiente al 24 de abril de 2001 y aquellas individualizadas vectorialmente por medio de la aplicación del índice CEDEX.

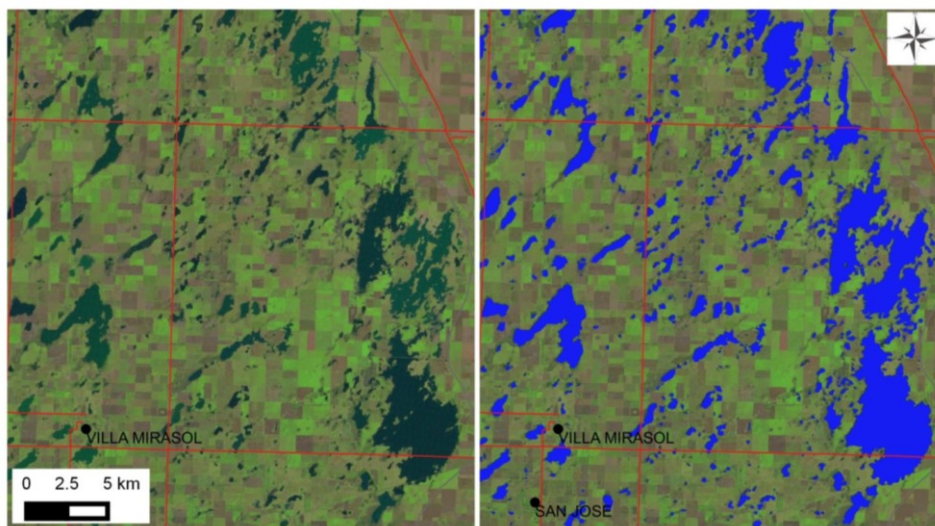


Figura 2. Comparación visual entre la imagen Landsat y la Individualización vectorial de lagunas obtenidas por medio de la aplicación del índice.

Análisis hidrológico

Debido a la gran variabilidad en la ocurrencia de las lagunas se implementó un sistema de clasificación donde se diferenció a los cuerpos de agua, en lagunas permanentes, siendo aquellas presentes en todos los períodos (2001, 2009 y 2013), semi-permanentes, presentes en períodos húmedos y medios (2001 y 2013) y temporarias, aquellas lagunas sólo presentes en períodos húmedos (2001). A la clasificación de cuerpos de agua anteriormente descrita que identifica de un modo general el carácter hidrológico emergente más característico de los mismos, se le sumó un muestreo hidroquímico, un análisis del mapa de elevación del terreno a partir de la confección de redes de drenaje y definición de cuencas de aporte, y la inspección visual de imágenes de Google Earth®, a los efectos de identificar sistemas hídricos o agrupamientos de lagunas cuya presencia esté vinculada y/o asociada a geoformas y a distintas condiciones hidrológicas. Este análisis se complementó con el análisis de metadata que incluyó información histórica catastral, perfiles litológicos y estudios específicos descriptivos o de aprovechamiento.

RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de la información analizada, se identificaron e inventariaron para el área de estudio un total de 4.554 lagunas entre permanentes, semi-permanentes y temporarias. Además, se identificaron en períodos húmedos 8.132 lagunas temporarias de menor extensión (T) que totalizan una superficie de 15.578 ha. En la Figura 3 se puede observar el contraste entre los dos períodos extremos, en azul las lagunas temporarias cuya ocurrencia se verifica en períodos húmedos y superpuestas en rojo las permanentes siendo las únicas lagunas presentes en períodos secos. La Tabla 2 detalla el ordenamiento de las lagunas permanentes, semipermanentes y temporarias según regiones hídricas, su ocurrencia y sus correspondientes superficies en las distintas condiciones analizadas. El área anegada

fluctuó considerablemente entre los tres períodos, totalizando 185.547 ha en la condición húmeda, 40.157 ha en el período medio y reduciéndose a sólo 13.590 ha en la condición seca.

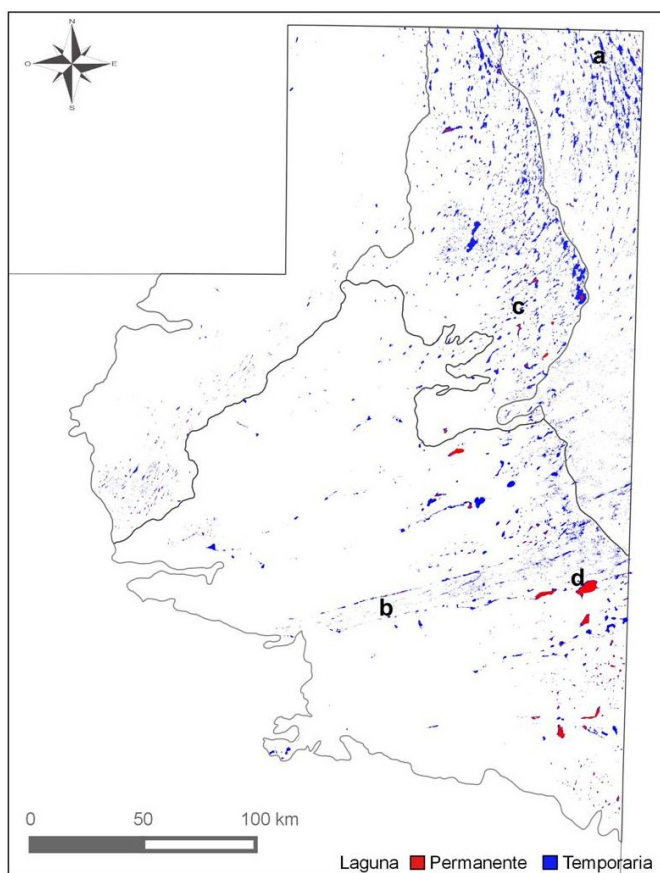


Figura 3. Lagunas identificadas en el área de estudio correspondientes a condiciones extremas. Se indican los puntos donde las lagunas son ilustradas con mayor detalle en Figura 4.

Tabla 2. Tipo de lagunas por región hídrica, número y superficie según condición hídrica.

REGIÓN	TIPO	Nr.	SUPERFICIE (ha)		
			2009	2013	2001
Región I	Permanente	21	535	1727	2415
	Semipermanente	254		6255	18803
	Temporal	1176			19510
	T menores	4650			6344
Región II	Permanente	17	1877	3076	8695
	Semipermanente	333		13547	36824
	Temporal	1063			20532
	T menores	1918			5562
Región III	Permanente	99	570	615	1450
	Semipermanente	16		260	488
	Temporal	293			4035
	T menores	273			321
Región IV	Permanente	117	10607	10929	17439
	Semipermanente	129		3749	11723
	Temporal	1036			28053
	T menores	1291			3352
Totales			13590	40157	185547

El marcado contraste observado en el número, extensión y conexión de lagunas entre los distintos períodos, efecto que no fue uniforme entre las regiones hídricas analizadas, dejó de manifiesto la influencia de geoformas características que, ya sea por tipo o influencia sobre procesos de infiltración y descarga, su ubicación topográfica, la relación con los niveles saturados, el área de aporte y red de drenaje de escurrimientos superficiales, determinan la ocurrencia de lagunas. A modo de síntesis, aquellas lagunas cuya presencia está más o menos vinculada y se encuentran fundamentalmente relacionadas a geoformas, régimen pluviométrico y a su relación al agua subterránea, se las pueden eventualmente asociar a sistemas hídricos y agrupar en cuatro tipos principales.

a) Lagunas en áreas medanosas: su ocurrencia se manifiesta en áreas de extensa cobertura arenosa ubicándose en zonas o depresiones intermedanos. Son muy numerosas en años húmedos como respuesta a la pluviometría directa y a la descarga local del agua subterránea. No poseen una red de drenaje superficial definida. Son de carácter semipermanente o temporario, dado que en períodos secos al descender el nivel freático y por efecto de la evaporación suelen desaparecer. La calidad de sus aguas suele ser muy buena calificándose las mismas como hipo o mesosalinas, sin embargo su intermitencia hace que se vea degradada. Ejemplos de dichos cuerpos de agua son las lagunas ubicadas en el NE de la provincia y en el área de El Meauco.

b) Lagunas en cordones medanosos ubicados en valles o en cubetas de deflación: la ocurrencia de estas lagunas se manifiesta en cordones medanosos ubicados en

depresiones o valles transversales. En este caso se podrían diferenciar las lagunas dentro del cordón medanoso propiamente dicho con un comportamiento similar a las descriptas anteriormente y aquellas ubicadas en sus flancos contenidas contra el talud del valle o de la cubeta, cuya ocurrencia es producto de la descarga subterránea de los cordones medanosos. Estas últimas, suelen ser de carácter permanente y pueden alinearse interconectándose en períodos húmedos como ocurre en el Valle Argentino. La calidad del agua está estrechamente ligada a las flujos de recarga y descarga subterránea, registrándose una condición hipersalina en aquellas ubicadas en los flancos de los cordones medanosos.

c) Lagunas en áreas de planicie: su ocurrencia se manifiesta en depresiones ubicadas en la planicie estructural. En general no poseen un área de aporte superficial careciendo de patrones de drenaje definidos. Conforman un conjunto de lagunas independientes que pueden o no presentar un patrón de alineamiento particular. Dichas lagunas pueden o no estar vinculadas al nivel freático dependiendo de su ubicación topográfica, y no son de gran extensión. Eventualmente en períodos húmedos pueden interconectarse. Son de carácter temporario o semipermanente y la calidad del agua es variable, típicamente mesosalinas degradándose producto de la evaporación. Ejemplo de este tipo de lagunas incluyen a las lagunas ubicadas en la planicie entre los valles transversales como al norte de Guatrache y aquellas ubicadas al NNE de Santa Rosa y en inmediaciones de Mauricio Mayer.

d) Lagunas como nivel de base de sistemas hídricos: su ocurrencia se manifiesta en extensas depresiones ubicadas al final de los valles transversales o en extensas cubetas de deflación que actúan como nivel de base del flujo subterráneo. Poseen además una red de drenaje superficial definida que abarca una área de aporte de gran extensión cuya activación está relacionada a la existencia de precipitaciones locales. Típicamente por encontrarse en áreas de descarga acuífera, conforman salinas siendo clasificadas como hipersalinas extremas. Su carácter es mayoritariamente permanente. Dependiendo de su ubicación topográfica, pueden encontrarse algunas lagunas desconectadas del nivel freático en épocas de sequía, actuando como colectores de escurrimiento superficial que les confiere una característica de hipo o mesosalinas. Ejemplos incluyen: Salinas Grandes, Laguna de Guatraché, laguna de Chadilauquen, y el conjunto de las lagunas del Guanaco o Luanlauquen.

La Figura 4 ilustra en detalle un ejemplo de cada uno de los tipos principales de lagunas descriptos. Se observa en a) numerosas lagunas al NE de la provincia alineadas con rumbo NO-SO en cercanías al sistema del río Quinto, b) lagunas ubicadas en los flancos y dentro del cordón medanoso del Valle de Utracán perteneciente al Valle Argentino, c) lagunas sobre la planicie estructural identificadas al norte de la localidad de Mauricio Mayer, y d) la laguna Salinas Grandes, área de descarga subterránea de gran extensión y de carácter permanente que constituye el nivel base del sistema.

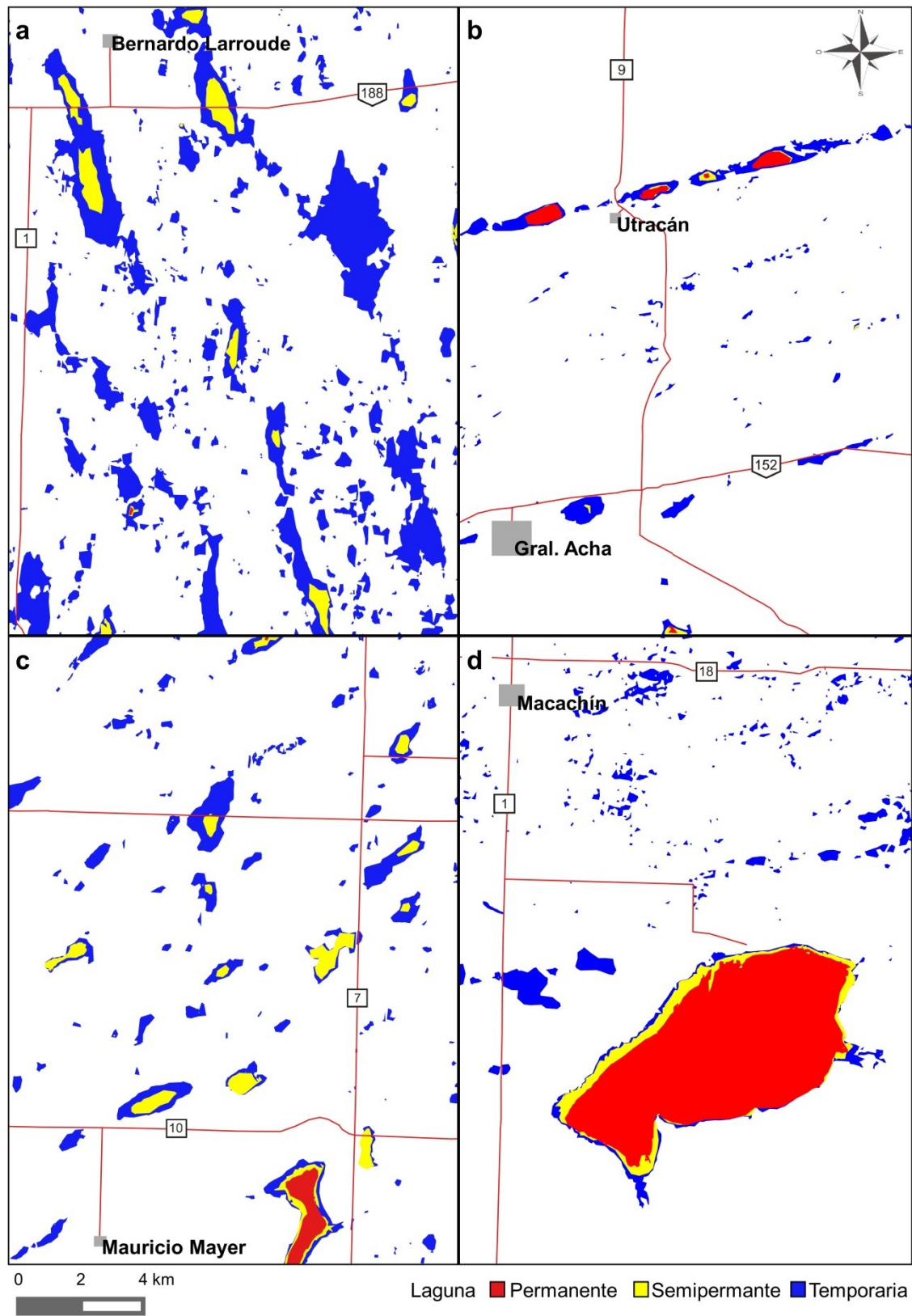


Figura 4. Lagunas agrupadas según geoformas, régimen pluviométrico y relación aguas superficial- subterránea. Puntos a),b),c) y d) pueden ser localizados en Figura 3.

CONCLUSIONES

Este trabajo describe la ocurrencia y la evolución espacio temporal de los cuerpos de agua identificados en el noreste de la provincia de La Pampa. Las tareas basadas en la interpretación de sensores remotos permitieron la caracterización de las lagunas mediante:

- Identificación, que incluye su localización espacial, sistematización de información antecedente y una nomenclatura específica en concordancia a su ubicación catastral;
- Clasificación, reconoce su comportamiento hidrológico en función de su permanencia;
- Cuantificación, establece la superficie de las lagunas identificadas en diferentes condiciones hidrológicas.

A partir del análisis integrador de las características propias de las lagunas tanto morfológicas como químicas, del entorno geomorfológico y de la relación agua superficial y subterránea, fue posible la diferenciación de lagunas en permanentes, semi-permanentes y temporarias y su agrupamiento en sistemas hídricos más o menos definidos, donde se diferencian cuatro tipos principales que definen su ocurrencia y su dinámica hidrológica. En base a ello se identificaron lagunas en amplias áreas medanosas; lagunas asociadas a cordones medanosos en valles o en cubetas de deflación, lagunas de la planicie estructural, y lagunas que actúan como nivel de base de sistemas hídricos regionales.

Considerando que el área de estudio es parte de un ambiente de llanura, con las singularidades propias de la llanura pampeana occidental, la metodología empleada mostró una adecuada descripción de la activación y reducción del área inundada bajo diferentes condiciones hidrológicas. Consecuentemente, fue posible evaluar la significativa fluctuación del área inundada de 185.547 ha a 13.590 ha en períodos contrastantes y permitió el inventariado de las lagunas constituyendo así una valiosa herramienta gestión de los recursos hídricos de la provincia de La Pampa.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa por la información suministrada y el apoyo prestado en tareas logísticas de campaña y laboratorio.

REFERENCIAS

- Ángel Martínez, M. C., 1994. Aplicación de la Teledetección en la localización de superficies de agua. Informe CEDEX, Madrid.
- Castaño, S., Mejuto, M. F., Vela, A., Quintanilla, A. y Ruiz, J. R., 1999. Monitoring of wetlands evolution. In: Application of Space Techniques to the Integrated management of river basin Water Resources. Montesinos, S. and S. Castaño, S. (Eds.). Final Report. Environment and Climate Programme. European Commission. Centre for Earth Observation, Albacete, pp. 27-49.
- Dornes, P.F., Pochetti, R.A. y Buss, R.G., 2014. Relación entre procesos de escorrentía y recarga en la llanura pampeana occidental. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Arg. ISBN: 978-987-692-039-1. 10 págs.
- Giraut, M., Lupano C., Schulz, C. y Rey, C., 2006. Cartografía Hídrica Superficial de la provincia de La Pampa. 3er. Cong. de la Ciencia Cartográfica y X Semana Nac. de Cartografía, Buenos Aires.
- Hanqiu Xu, 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. Int. Journal of Remote Sensing. 27, N° 14, 3025-3033.
- Kruse, E. y Zimmermann, E.D., 2002. Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). En: Groundwater and Human Development. Bocanegra, E., Martínez, D., y Massone, H. (Eds.). 2025-2038. ISBN 987-544-063-99.
- Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam), 2015. Inventario de los Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa. 1ra Etapa Regiones I-IV. Convenio Sec. de Rec. Hídricos de La Pampa.
- Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P. y Rivas R., 1999. Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín Geológico y Minero*. 110 (4). 391-406. ITGE-IAH-UNESCO.